中国生态农业学报 2017 年 3 月 第 25 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2017, 25(3): 451−459

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160677

张建平, 王靖, 何永坤, 陈艳英. 基于 WOFOST 作物模型的玉米区域干旱影响评估技术[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 451−459
Zhang J P, Wang J, He Y K, Chen Y Y. Evaluation of regional drought disaster to maize using WOFOST crop growth model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 451−459

基于 WOFOST 作物模型的玉米区域干旱影响评估技术*

张建平[1], 王 靖[2], 何永坤[1], 陈艳英[1]

(1. 重庆市气象科学研究所 重庆 401147; 2. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193)

摘 要: 为探讨作物区域干旱影响评估技术, 拓展农业气象灾害区域影响评估方法, 基于 WOFOST 作物模型, 以西南玉米干旱为研究对象, 对发育期、光合生产等模块进行了改进与提高, 利用西南地区 8 个代表性站点的玉米田间观测数据和同期逐日气象数据对模型进行了适宜性检验, 在此基础上, 选择西南地区历年典型干旱年份, 模拟分析了玉米的产量变化趋势, 并与实际减产率作了对比分析。结果表明: 改进后, 玉米生育期模拟值与实测值归一化均方根误差(NRMSE)由原来的 3.25%~6.95%降低到 1.48%~3.07%, R^2 由原来的 0.57~0.79 提高到 0.63~0.99, 平均模拟精度由原来的 74.12%提高到 78.9%。玉米产量模拟值与实测值 NRMSE 范围由原来的 7.88%~11.99%降低到 3.07%~6.79%, R^2 由原来的 0.52~0.93 提高到 0.77~0.98, 平均模拟精度由原来的 75.7%提高到 80.95%。对 1987 年、1992 年及 2006 年西南地区关键生育期典型干旱年份产量模拟平均精度分别是 69.8%、78.1%与 75.9%。结合上述分析可得出模型对发育期与产量的模拟精度都有不同程度地提高, 模型对西南玉米主产区干旱影响评估有很好的反应, 对干旱分布范围与分布规律的模拟值与实际情况基本接近, 表明该方法可为区域干旱影响评估提供一种更为科学的评估技术。

关键词: 作物模型; WOFOST; 玉米; 干旱; 生育期; 产量; 模拟精度; 影响评估
中图分类号: S365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)03-0451-09

Evaluation of regional drought disaster to maize using WOFOST crop growth model*

ZHANG Jianping[1], WANG Jing[2], HE Yongkun[1], CHEN Yanying[1]

(1. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Timely and accurate assessment of the impacts of drought on maize in the maize producing areas in Southwest China for regional agricultural production planning has become increasingly important with more frequent and severe drought events. In order to effectively study the impact of drought on crop production, the assessment method of agricultural meteorological disaster should be expanded. This study evaluated the application of WOFOST model using field experimental data of maize and the parallel daily meteorological data collected at eight typical stations in Southwest China. The WOFOST model was improved for the phenology and photosynthesis modules before application. Based on the improved crop model, the historical impacts of drought on maize production in terms of change trend in maize yield for typical drought years were analyzed. The results showed that the normalized root mean squared errors (NRMSE) between the simulated and observed maize phenology

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题(2013CB430205)和重庆市业务技术攻关重点项目(ywgg-201509)资助
张建平, 主要从事农业气象灾害评估与作物系统模拟。E-mail: jeepjohn@163.com
收稿日期: 2016-07-22 接受日期: 2016-12-02

* Funded by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB430205) and the Key Project of Technology Service Tackle of Chongqing (ywgg-201509)
Corresponding author, ZHANG Jianping, E-mail: jeepjohn@163.com
Received Jul. 22, 2016; accepted Dec. 2, 2016

reduced from the range of 3.25%–6.95% to 1.48%–3.07%, R^2 increased from 0.57–0.79 to 0.63–0.99 and the average simulation precision increased from 74.12% to 78.9%. NRMSE between simulated and observed maize yields reduced from the ranges of 7.88%–11.99% to 3.07%–6.79%, R^2 increased from 0.52–0.93 to 0.77–0.98 and the average simulation precision increased from 75.7% to 80.95%. The average simulation precisions of maize yield were 69.8%, 75.9% and 78.1% in typical drought years of 1987, 1992 and 2006, respectively. The above results showed that the simulation precision of the phenology and yield of maize improved significantly and the model was therefore fully applicable in simulating the impacts of drought on maize production. The study provided a scientific technique for the drought assessment on regional maize production in Southwest China.

Keywords: Crop growth model; WOFOST; Maize; Drought; Phenology; Yield; Simulation precision; Impact assessment

农业干旱灾害是个世界性问题[1]。近年来，在全球气候变暖、极端气候事件趋多增强的大背景下，西南地区降水和河川径流变化波动明显增大，再加上降水时空分布不均的影响，导致该区域干旱发生频率升高，对当地农业生产造成很大威胁[2]。因此，及时准确地评估干旱对西南地区农业生产的影响，对区域农业防灾减灾具有重要的现实意义。由于干旱形成机理和分布规律比较复杂，再加上农业生态系统本身的复杂性，由此造成农业干旱灾害影响评估的复杂性[3]。就现有研究来看，常用的农业干旱影响评估方法主要有实地调查估算法、数理统计法、遥感监测评估法、历史统计相似分析法以及作物模型模拟分析法。由于以上 5 种方法各有优缺点，有时单独使用，有时结合使用[4]。作物模型是作物科学应用计算机的一个新的研究领域，是利用系统分析和计算机技术，综合作物生理生态、农业气象、土壤和农学等学科研究成果，将作物与其生态环境因子作为整体进行动态的定量化分析和生长模拟的过程[5-6]。国外关于作物模型在农业气象影响评估中的应用报道最多的是农业干旱灾害，基于各种作物模型，研究了干旱对农业所产生的影响[7-10]。我国应用作物模型进行农业气象灾害影响评估也已经有一定的进展。“九五”期间将作物生长模型引入冬小麦干旱识别和预测中，通过改进作物指标形式，以旬初土壤水分和该旬的水分需供比作为干旱指标，建立了华北冬麦区土壤干旱和作物干旱指标体系[11]。“十五”期间，开始研制利用区域气候模式与作物生长模式相结合预测作物干旱等相关技术[12]，由于区域气候模式预测与作物模式预测结果本身存在误差，当两个模式发生连接时就会产生累积误差，因此这种方法中的关键问题仍待进一步探讨。此外，作物模型在低温冷害评估中也得到了初步应用[13-14]。从以上研究可以看出，虽然作物模型已在各类农业气象灾害中都有不同程度的应用，但由于模型需要输入的作物参数太多，导致模型本地化释用程度不高，模型对发育期与产量模拟的精准度不高，最终影响模型后续评估应用[15]。鉴于此，本研究针对当前作物模型应用于干旱评估中存在的问题与不足，拟对模型的部分模块进行改进与完善，进而研究探讨西南玉米区干旱影响评估技术，以期为区域干旱影响评估提供一种新的方法。

1　资料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于 98°~110°E 与 20°~35°N 之间，包括云南省、四川省、贵州省和重庆市(简称“三省一市”)。该区域地势起伏大，气候区域差异显著，降水时空分布极为不均，易形成季节性连旱和区域性干旱。玉米的生产区域多分布在山区、半山区坡地，属雨养旱作农业。因西南地区立体气候明显，导致农业种植区域差异大，即使是同一种作物，在不同的海拔高度，其生育期与发育进程差别很大[2]。鉴于此，根据西南区域特点、农业气候特征以及农作物种植相似性，将研究区玉米种植区细分为 7 个子区域[2]，见图 1。

1.2　研究资料

研究资料为云南、贵州、四川和重庆等地 61 个台站的气象资料，主要包括：逐日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数、日降水量、2 m 高处风速和水汽压。同期玉米发育期数据与产量数据资料年限为 1981—2010 年。来源于中国气象局国家气象信息中心资料室。玉米发育期数据主要包括播种、出苗、拔节、抽雄、灌浆、乳熟、成熟等发育阶段。土壤资料为 4 省市土壤的物理性质、肥力特性等数据，主要包括田间持水量、凋萎系数、土壤容重等。均来源于各省市气象部门。

1.3　研究方法

基于 WOFOST 作物模型，以西南玉米干旱为研究对象，并对发育期、光合生产等模块进行改进与提高，选取研究区 8 个典型代表站点对模型进行适宜性检验分析，通过数值模拟的方法，模拟分析了研究区历年典型干旱年份玉米产量损失情况，并与实际减产率作对比分析。

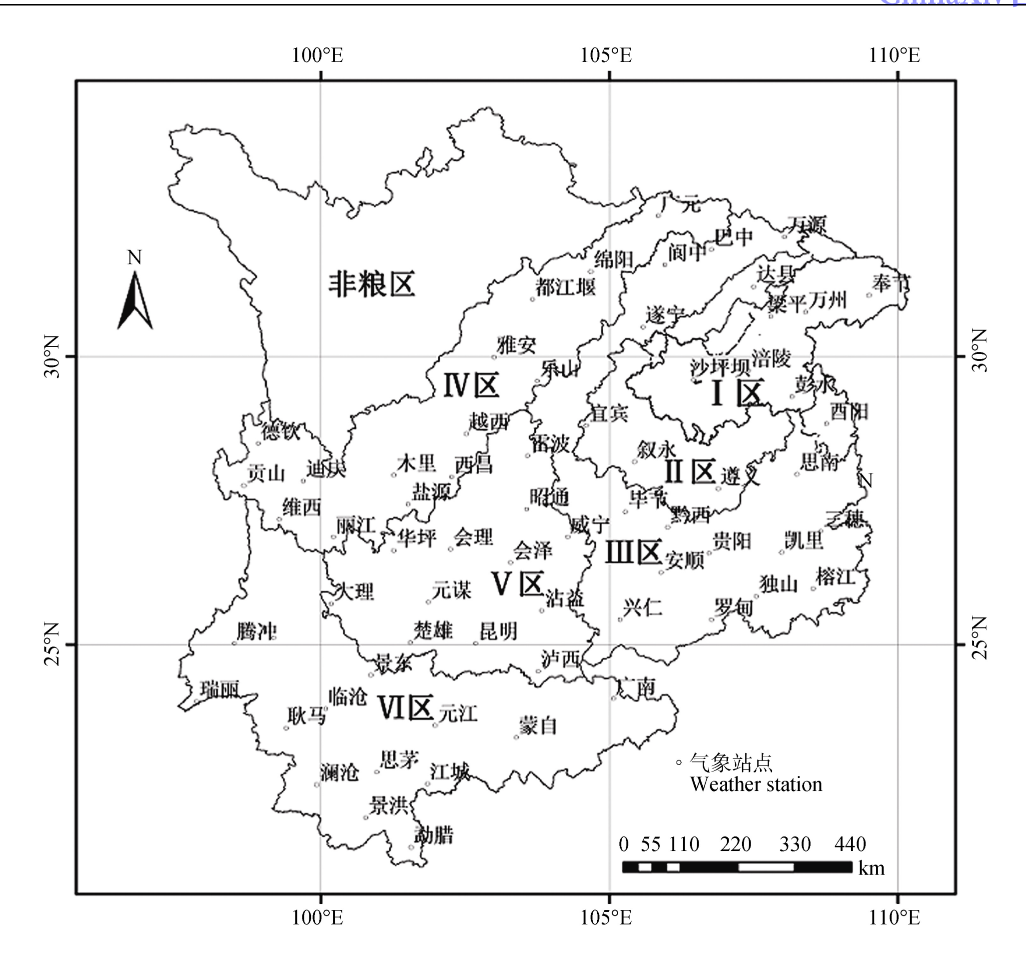


图 1　研究区玉米种植分区及气象站点分布图

Fig. 1　Sketch map of regionalization of maize plantation and weather stations distribution in the study area

1.3.1　作物模型简介

作物模型选取 WOFOST(world food study)模型，该模型由荷兰瓦赫宁根大学 de Wit 等开发，起源于世界粮食研究中心(CWFS)组织的多学科综合的世界粮食潜在产量的研究项目，旨在探索增加发展中国家农业生产力的可能性[16-17]。WOFOST 是一个根据气象和土壤条件模拟作物根、茎、叶和穗生物量以及土壤水分的动态模型。作物生长过程主要包括发育、光合作用、呼吸作用、干物质积累及分配等。土壤水分平衡过程主要包括降水、灌溉、渗透、地表蒸发、作物蒸腾、毛管水上升等[18-19]。

1.3.2　模型的改进与提高

由于 WOFOST 模型自身存在着一定的不足之处，比如无法模拟极端气候事件(高温、干旱)对农作物造成的影响损失[13]。另外，国外作物模型在国内引进应用时，本地化程度不可能完全符合当地实际情况。因此，完全有必要对模型进行改进与提高，以最大化地增强其应用能力。本研究主要有 3 点改进：1)针对水分胁迫模拟能力的改进；2)针对发育速率的改进；3)针对光合速率的改进。关于模型对水分胁迫的模拟能力的改进，采用相对蒸腾序列的 10 d 滑动平均值表示农田实际水分动态变化过程，详见参考文献[19]。这里主要详述另外两种改进模型模拟能力的方法。

1)针对发育速率的改进

调参时，模型要求输入的气象数据必须是正常年份下的观测数据，这样才能保证确定出的模型参数的合理性与普适性，但现实情况中很难找到完全符合条件的气象数据，因此导致验证模型时作物发育期模拟值与实测值误差较大，从而影响模型的区域应用。针对这一问题，本文加以改进与提高。WOFOST 原模型中的发育期模块采用“积温法”模拟发育进程，模型将作物整个生育期划分为出苗到开花、开花到成熟两个发育阶段，每个发育阶段的有效积温作为模型发育参数[20]。积温法表征的发育速率公式为：

$$D_{r,t}=\frac{T_{ei}}{\mathrm{TSUM}_j}\quad (j=1,2) \tag{1}$$

式中：$D_{r,t}$ 为 t 时刻的发育速率(d^{-1})，T_{ei} 为有效温度(℃)，TSUM_j 为完成某一发育阶段所需的有效积温(℃·d)。为了使调试出的作物参数具有通用性，将(1)式用系数 k 来加以订正，以提高其对作物发育期模拟

的精准性。公式如下:

$$D_{r,t} = k\frac{T_{ei}}{\text{TSUM}_j} \qquad (j=1,2) \tag{2}$$

式中: k为温度对发育速率的影响系数，可由正常年份下作物的生育期日数 D_t 与灾害年份下作物的生育期日数 $D_{t'}$ 的比值求得，即:

$$k = \frac{D_t}{D_{t'}} \tag{3}$$

$k>1$为高温年份，$k<1$为低温年份。

2)针对光合作用速率的改进

光合作用，特别是光合有效辐射，是形成植物生物量的基本能源，直接影响着植物的生长、发育、产量和产品质量。光合作用将无机物转化为有机物并贮存能量，这个过程是作物产量形成的关键，同时，作物光合作用极易受到各种环境因素的影响，而温度又是其中的一个主要环境影响因子。WOFOST 原模型中相对冠层高度 L 处瞬时光合作用速率 A_L ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)是光饱和时光合作用速率 A_m ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)和所吸收辐射量 I ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)的函数，以负指数形式表示:

$$A_L = A_m(1-\text{e}^{\frac{-\varepsilon I}{A_m}}) \tag{4}$$

式中: ε 为初始光能利用率。冠层光合作用速率采用 Gaussian 三点积分法，对叶片在时间和空间的瞬时光合作用速率进行积分。首先将冠层高度分 3 层，计算各层瞬时光合作用速率，加权求冠层总的瞬时光合作用速率；然后将一日分为 3 点，加权冠层各点总的瞬时光合作用速率，最后求得日总光合作用速率。计算公式如下:

$$L = (0.5 + P\sqrt{0.15})\text{LAI} \qquad (P=-1,0,1) \tag{5}$$

$$A_h = \frac{\text{LAI}(A_{-1}+1.6A_0+A_1)}{3.6} \tag{6}$$

$$T_h = 12 + 0.5D(0.5 + q\sqrt{0.15}) \qquad (q=-1,0,1) \tag{7}$$

$$A_\text{d} = \frac{D(A_{h,-1}+1.6A_{h,0}+A_{h,1})}{3.6} \tag{8}$$

式中: LAI 为叶面积指数，p 为对冠层高度的积分点，L 为相对冠层 p 处的叶面积指数，A_h 为整个冠层某一时刻的瞬时光合作用速率，D 为日长，q 为对时间(日)的积分点，T_h 为每日 q 时刻，A_d 为日总 CO_2 同化速率。

为了提高模型的本地化水平以及模型对产量模拟的精准性，计算光合作用速率时，采用黄耀等[21]根据实验室不同温度条件下光合速率的测定结果，公式如下:

$$P = \text{TF}\cdot\text{PO} \tag{9}$$

式中: TF 可以分两种情况表示为:

$$\text{TF}_1 = \begin{cases} -0.631+0.112\cdot T-0.00193\cdot T^2 \\ 10\ ℃ \leqslant T \leqslant 29\ ℃ \end{cases} \tag{10}$$

$$\text{TF}_2 = \begin{cases} -0.928+0.114\cdot T-0.00267\cdot T^2 \\ 29\ ℃ < T \leqslant 40\ ℃ \end{cases} \tag{11}$$

式中: P 和 PO 分别为实际温度和最适温度影响下的光合速率。

1.3.3 模型适宜性检验

作物模型在应用前，必须先进行调参以确定模型参数，详细调参过程与参数确定方法以及单点验证详见文后参考文献，因篇幅所限，此处不再赘述。因本研究针对模型应用中存在的问题与不足进行改进，故这里着重对模型改进前后作区域适宜性检验分析。本文从云南、贵州、四川、重庆 4 地分别选取两个代表站点对模型进行区域适宜性检验分析，考虑到西南地区区域差异大，立体气候较为明显，因此，在站点的选取上尽量保证其分布在不同的海拔高度，详见表 1。

表 1 西南地区模型验证站点、玉米品种及年份

Table 1 Maize varieties and years of data for model calibration in Southwest China

省(市) Province	站点 Station	海拔 Altitude (m)	品种 Variety	验证年份 Year for validation
云南 Yunnan	大理 Dali	1 001	会单 4 号 Huidan 4	1988—1989, 2004—2005
	元江 Yuanjiang	401	海禾 2 号 Haihe 2	1990—1991, 2002—2003
贵州 Guizhou	兴仁 Xingren	1 379	金玉 818 Jinyu 818	1995—1996, 2008—2009
	思南 Sinan	418	遵义 8 号 Zunyi 8	1989, 1995, 2002—2003
四川 Sichuan	巴中 Bazhong	360	先玉 1171 Xianyu 1171	1993—1994, 2001—2002
	雷波 Leibo	1 476	华龙玉 4818 Hualongyu 4818	1989—1990, 1998—1999
重庆 Chongqing	沙坪坝 Shapingba	260	鼎玉 8 号 Dingyu 8	1994—1995, 2007—2008
	酉阳 Youyang	665	东单 80 号 Dongdan 80	1990—1991, 2003—2004

判定模型模拟的精准性，采用以下统计指标：归一化均方根误差 NRMSE 与决定系数 R^2。NRMSE 可反映模拟值与实测值之间的相对误差，值越小表明模拟效果越好。R^2 可反映模拟值与实测值之间的一致性，值越接近 1 表明模拟效果越好[22]。

2　结果与分析

2.1　改进后 WOFOST 模型的适宜性检验

图 2 是西南地区玉米生育期适宜性检验结果，从图中可以看出，模型改进前，8 个站点玉米生育期模拟值与实测值 NRMSE 范围为 3.25%~6.95%，R^2 为 0.57~0.79，平均模拟精度为 74.12%。模型改进后，8 个站点玉米生育期模拟值与实测值 NRMSE 范围为 1.48%~3.07%，R^2 为 0.62~0.99，且模拟值均落在 1∶1 线附近，平均模拟精度为 78.9%。可见，改进模型后，对玉米生育期的平均模拟精度提高了 4.78%。

图 3 是西南地区不同海拔高度站点玉米产量适宜性检验结果，从图中可以看出，模型改进前，8 个站点玉米产量模拟值与实测值 NRMSE 范围为 7.88%~11.99%，R^2 为 0.52~0.93，平均模拟精度为

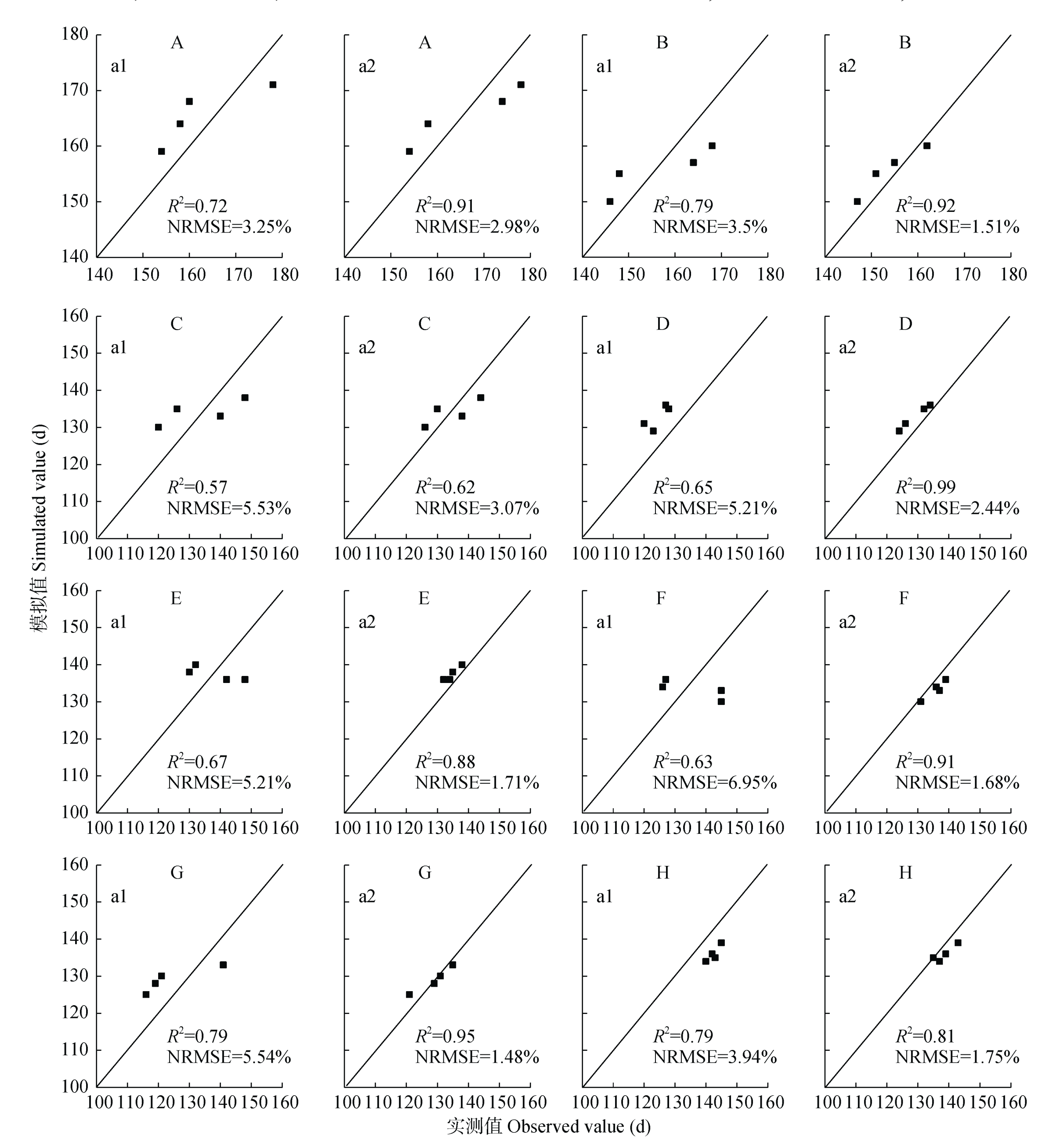


图 2　WOFOST 作物模型改进前后西南地区不同站点玉米生育期的模拟值与实测值的比较

Fig. 2　Comparison of simulated and measured values of maize growth period before and after WOFOST crop model improvement in different stations of Southwest China

A：大理; B：元江; C：兴仁; D：思南; E：巴中; F：雷波; G：沙坪坝; H：酉阳. a1：改进前; a2：改进后。A: Dali; B: Yuanjiang; C: Xingren; D: Sinan; E: Bazhong; F: Leibo; G: Shapingba; H: Youyang. a1: before improvement; a2: after improvement.

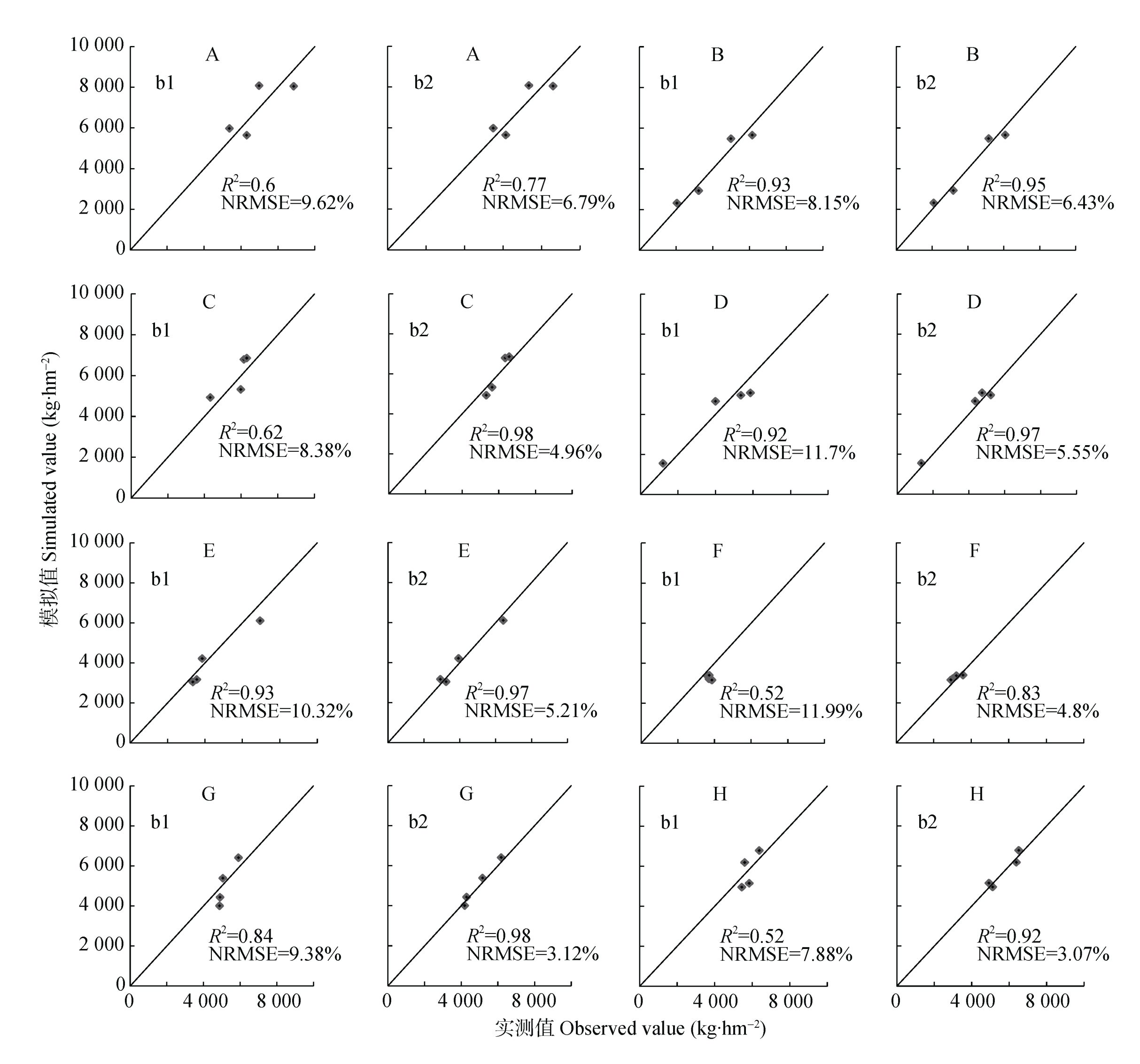


图 3 WOFOST 作物模型改进前后西南地区不同站点玉米产量模拟值与实测值的比较

Fig. 3 Comparison of simulated and measured values of maize yield before and after WOFOST crop model improvement in different stations of Southwest China

A: 大理; B: 元江; C: 兴仁; D: 思南; E: 巴中; F: 雷波; G: 沙坪坝; H: 酉阳. b1: 改进前; b2: 改进后。A: Dali; B: Yuanjiang; C: Xingren; D: Sinan; E: Bazhong; F: Leibo; G: Shapingba; H: Youyang. b1: before improvement; b2: after improvement.

75.7%。模型改进后，8 个站点玉米产量模拟值与实测值 NRMSE 范围为 3.07%~6.79%，R^2 为 077~0.98，平均模拟精度为 80.95%。可见，改进模型后，对玉米产量的平均模拟精度提高了 5.25%。

2.2 典型干旱年份的模拟结果

从历年来看，西南地区发生了数次范围广、强度大的干旱，据统计，每个年代里均有干旱发生。各年代的典型干旱年依次为：1969 年、1972 年、1987 年、1992 年、2006 年[23]。由于 1969 年与 1972 年无产量资料，因此仅以 1987 年、1992 年及 2006 年为例，基于作物模型对每年玉米生育期内干旱进行动态模拟，以减产率来表征干旱对玉米产量造成的损失程度，并与当年实测产量进行对比，以验证作物模型对西南农业干旱影响的模拟能力。根据统计资料记载[24-25]，1987 年西南干旱主要发生在出苗到拔节期，1992 年西南干旱主要发生在出苗到拔节期到抽雄期，而 2006 年干旱主要集中在川渝地区，发生时段为拔节到抽雄到灌浆结实期。

从西南地区历年玉米生育期内干旱影响的模拟结果来看，1987 年干旱主要影响西南地区的北部与西部，而且以偏西偏东部位最为严重，各地玉米减产率为 0.52%~26.49%，大部地区玉米减产率在 10%以内，西南地区玉米平均减产率为 8.02%，通过与实际减产情况对比可见，除云南南部外，其余地区模型对干旱分布范围及规律的模拟值与实际情况基本接近，且产量损失程度与实际情况较为一致，模拟准确度为 69.8%。1992 年干旱主要影响西南地区的中东部，各地玉米减产率为 0.65%~31.61%，西南

地区玉米平均减产率为 11.88%，局地干旱程度比 1987 年较为严重，与实际减产对比发现，干旱分布范围及规律的模拟值与实际情况较为符合，模拟准确度高达 78.1%。2006 年干旱影响范围与 1992 年较为相似，受旱区域主要集中在西南地区的中东部，各地玉米减产率为 1.14%~32.9%，这一年西南地区玉米平均减产率为 9.87%，与实际减产对比发现，因模型自身原因，对重旱区的模拟能力不是很理想，但从干旱分布范围与规律来看与实际情况也较为吻合，模型的平均模拟精度为 75.9%(图 4)。

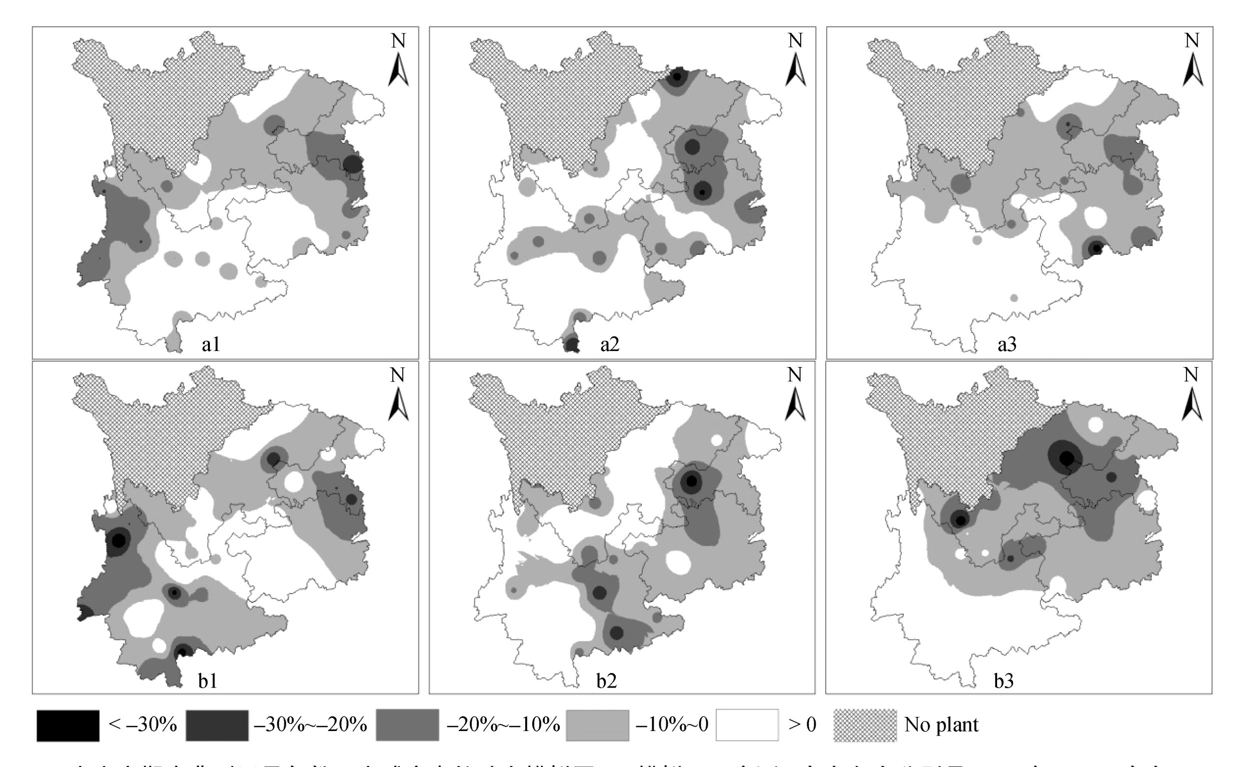


图 4　玉米生育期内典型干旱年份玉米减产率的动态模拟图(a: 模拟; b: 实测; 自左向右分别是 1987 年、1992 年与 2006 年)

Fig. 4　Dynamic simulation of maize yield reduction rates in typical dry years during growing periods of maize (a: simulation; b: observation; from left to right, the year is 1987, 1992 and 2006, respectively)

减产率均是本年度产量与上一年度产量相比的结果。The rate of yield reduction is the result of this year's output compared with the output of the last year.

3　结论与讨论

本文基于 WOFOST 作物生长模型，针对研究灾种，对作物模型作了适当改进，并根据研究区域特征，有代表性地选取不同海拔高度的站点对模型改进前后进行检验分析，在此基础上，模拟分析了西南地区典型干旱年份玉米产量变化趋势。并与实际情况进行了对比分析。从历年典型干旱年份模拟结果来看，模型对干旱分布范围与分布规律的模拟值与实际情况基本接近，说明模型可以评估西南玉米产区干旱影响。可见，随着数值模拟技术的快速发展以及对农作物受灾机理理论认识的进一步深入，作物生长模型在农业气象灾害定量评估中是推动农业干旱监测从定性描述走向定量评估取得突破的核心环节[26]。作物生长模型在农业气象灾害评估中的优势在于机理性强，可以较好地反映出作物生育进程、产量与各生育阶段温度、降水量以及土壤水分动态的关系，能够从机理上定量地描述作物生长过程及其与环境因素之间的关系。但囿于其自身的限制因素，导致模型在应用时存在着一定的不足之处，如无法准确反映干旱的后效影响，本地化程度有待提高。基于此，本研究在大量模拟试验的基础上，对模型进行了适当改进。从模型检验以及模拟结果可以看出，模型的模拟精度大大提高，减少了模拟值与实测值之间的相对误差，极大地提高了模型的可靠性。但是，干旱对作物的影响非常复杂，同时模型的外围条件、各种参数的初始值仍存在很大的不确定性，对准确模拟也会造成一定影响。因此，这方面研究还需进一步加强与完善。另外，多数作物模型都是基于田间尺度或者单站点开发和建立的，如何将其扩展到区域尺度，这就要涉及一个模型由点到面的尺度转换问题。本研究中区域模型用到的作物参数主要有两种：一种是与温度有关的作物参数值，由于这类参数在空间上是相关的，因此可利用空间插值获得。其他作物参数通过细化区域，然后在各

分区取代表站点的参数代表分区参数[27]。虽然通过改进模型以及处理不完善资料最大可能地控制和减少了误差，但仍然是在每个均匀的空间单元上应用作物模型，单元与单元之间并没有考虑水分、养分的相互交换作用，并不能从根本上解决水平方向物质交换问题[28]。因此，这部分工作也有待于今后作进一步研究探讨。

参考文献 References

[1] 张娟娟. 2006年重庆市特大干旱及其对农业的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008
Zhang J J. Research of serious drought and its influence upon the agriculture of Chongqing in 2006[D]. Chongqing: Southwest China University, 2008

[2] 刘宗元, 张建平, 罗红霞, 等. 基于农业干旱参考指数的西南地区玉米干旱时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 105–115
Liu Z Y, Zhang J P, Luo H X, et al. Temporal and spatial distribution of maize drought in Southwest of China based on agricultural reference index for drought[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 105–115

[3] 王春乙, 王石立, 霍治国, 等. 近10年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 659–671
Wang C Y, Wang S L, Huo Z G, et al. Progress in research of agro-meteorological disasters in China in recent decade[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 659–671

[4] 王春乙, 张雪芬, 赵艳霞. 农业气象灾害影响评估与风险评价[M]. 北京: 气象出版社, 2010
Wang C Y, Zhang X F, Zhao Y X. Impact and Risk Assessment of Agro-Meteorological Disasters[M]. Beijing: China Meteorology Press, 2010

[5] De Wit C T. Simulation of Assimilation, Respiration, and Transpiration of Crops[M]. Wageningen, The Netherlands: Wiley, 1978

[6] 高亮之. 农业模型研究与21世纪的农业科学[J]. 山东农业科学, 2001(1): 43–46
Gao L Z. Agricultural modelling research and agricultural sciences in the 21st century[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2001(1): 43–46

[7] Chapman S C. Use of crop models to understand genotype by environment interactions for drought in real-world and simulated plant breeding trials[J]. Euphytica, 2008, 161(1/2): 195–208

[8] Chipanshi A C, Ripley E A, Lawford R G. Large-scale simulation of wheat yields in a semi-arid environment using a crop-growth model[J]. Agricultural Systems, 1999, 59(1): 57–66

[9] Chuvaeva A D, Mutovina T V. Evaluation of the Drought Resistance of Winter Bread Wheat Breeding Material by Indirect Methods[M]. Fiziologiya Produktivnosti Iustoichivosti Zernovykh Kultur, 1988: 68–73

[10] Ewert F, Rodriguez D, Jamieson P, et al. Effects of elevated CO_2 and drought on wheat: testing crop simulation models for different experimental and climatic conditions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 93(1/3): 249–266

[11] 赵艳霞, 王馥棠, 裘国旺. 冬小麦干旱识别和预测模型研究[J]. 应用气象学报, 2001, 12(2): 234–241
Zhao Y X, Wang F T, Qiu G W. A study of assessing and forecasting models of drought in agriculture[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2001, 12(2): 234–241

[12] 刘建栋, 王馥棠, 于强, 等. 华北地区农业干旱预测模型及其应用研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 593–604
Liu J D, Wang F T, Yu Q, et al. A drought prediction model in North China plain and its application[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(5): 593–604

[13] 刘布春. 应用于低温冷害预报的东北玉米区域动力模型的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003
Liu B C. Study on a scaling-up maize dynamic model applying to low temperature damage prediction in EN, China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003

[14] 马玉平, 王石立, 李维京. 基于作物生长模型的东北玉米冷害监测预测[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1868–1878
Ma Y P, Wang S L, Li W J. Monitoring and predicting of maize chilling damage based on crop growth model in Northeast China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(10): 1868–1878

[15] 张建平, 何永坤, 王靖, 等. 不同发育期干旱对玉米籽粒形成与产量的影响模拟[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 43–49
Zhang J P, He Y K, Wang J, et al. Impact simulation of drought at different growth stages on grain formation and yield of maize[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(1): 43–49

[16] De Wit C T. Dynamic concepts in biology[C]//Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity. Proceedings International Biological Programö Plant Production Technical Meeting. Wageningen, Netherlands: PUDOC, 1970: 17–23

[17] Hijmans R J, Guiking Lens I M, van Diepen C A. User guide for the WOFOST 6.0. Crop growth simulation model[C]// Technical Document 12, DLO Winand Staing Centre. Wageningen, The Netherlands, 1994: 4–28

[18] Goudriaan J. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, 38(1/3): 249–254

[19] Goudriaan J. The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1988, 43(2): 155–169

[20] Goudriaan J. Crop Micrometeorology: A Simulation Study[M]. The Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1977

[21] 黄耀, 高亮之. 水稻群体物质生产的农业气候计算机模拟及最适季节[J]. 中国农业气象, 1988, 9(1): 4–6
Huang Y, Gao L Z. Agro-climate computer simulation and optimum season of rice mass production[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1988, 9(1): 4–6

[22] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. APSIM模型在西南地区的适应性评价——以重庆冬小麦为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4):

1237–1243
Dai T, Wang J, He D, et al. Adaptability of APSIM model in Southwestern China: A case study of winter wheat in Chongqing City[J]. Chinese Journal Applied Ecology, 2015, 26(4): 1237–1243
[23] 何永坤, 唐余学, 张建平. 中国西南地区干旱对玉米产量影响评估方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 185–191
He Y K, Tang Y X, Zhang J P. Evaluation method for effects of drought disaster on yields of maize in Southwest China[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 185–191
[24] 温克刚. 中国气象灾害大典(重庆卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2008
Wen K G. Chinese Meteorological Disasters (Vol. Chongqing)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008
[25] 李晶. 重庆市气象灾害年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2013
Li J. Chongqing Meteorological Disaster Yearbook[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013
[26] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1835–1848
Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Research progress and prospect of agricultural drought monitoring[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1835–1848
[27] 马玉平. 基于遥感信息的华北冬小麦区域生长模型及其模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2004
Ma Y P. Study on winter wheat regional simulation model based on remote sensing data and its simulations in North China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2004
[28] 罗毅, 郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 307–312
Luo Y, Guo W. Development and problems of crop models[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 307–312